УДК 331.45
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-3-55-63

# Разработка методики дистанционного спектрального зондирования техногенно нагруженных территорий

**Т. В. Бердникова, В. В. Ермаков**
Самарский государственный технический университет (г. Самара, Российская Федерация)

*Введение.* Рассмотрена проблема организации мониторинга техногенно нагруженных ландшафтов. Для ее решения авторами предложен инновационный метод исследования химического состава объектов по средствам прямого спектрального зондирования.
*Постановка задачи.* Задачей данного исследования является рассмотрение возможности применения спектрального зондирования для контроля состава грунтов на техногенно нагруженных территориях.
*Теоретическая часть.* Для подтверждения гипотезы о том, что наблюдение за изменениями в параметрах спектров отражения в неселективных областях позволит выявлять присутствие основных биогенных макроэлементов для растений в почве и оценивать ее плодородие или же определять степень загрязнения территории, был поставлен лабораторный эксперимент с применением современного спектрального оборудования и выполнена многомерная калибровка данных.
*Выводы.* Результаты проведенного анализа свидетельствуют о принципиальной возможности применения спектрального зондирования при мониторинге техногенно нагруженных территорий с использованием методов многомерного анализа данных.

***Ключевые слова:*** мониторинг, прямое спектральное зондирование, химический состав почв, многомерный анализ данных, индексы состояния.

***Для цитирования:*** Бердникова, Т. В. Разработка методики дистанционного спектрального зондирования техногенно нагруженных территорий / Т. В. Бердникова, В. В. Ермаков // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № . — С. 55–63. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-3-55-63

## Development of technique of remote spectral sensing of technogenically loaded territories

**T. V. Berdnikova, V. V. Ermakov**
Samara State Technical University (Samara, Russian Federation)

*Introduction*. The article considers the problem of monitoring technologically loaded landscapes. To solve it, the authors proposed an innovative method for studying the chemical composition of objects using direct spectral sensing means.
*Problem Statement*. The objective of this study is to consider the possibility of using spectral sensing to control the composition of soils in technogenically loaded territories.
*Practical Part*. To confirm the hypothesis that observing changes in the parameters of reflection spectra in non-selective areas will make it possible to establish the presence of basic biogenic macroelements for plants in the soil and evaluate its fertility, or determine the degree of contamination of the territory, a laboratory experiment was conducted using modern spectral equipment and multidimensional data calibration was performed.
*Conclusion*. The results of the analysis show the fundamental possibility of using spectral sensing in the monitoring of technogenically loaded territories using methods of multidimensional data analysis.

***Keywords***: monitoring, direct spectral sensing, soil chemistry, multivariate data analysis, state indices.

***For citation***: T. V. Berdnikova, V. V. Ermakov. Development of technique of remote spectral sensing of technogenically loaded territories. Safety of Technogenic and Natural Systems. 2021;3:55–63. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-3-55-63

**Введение.** За последние несколько лет техногенные нарушения почв достигли невиданных прежде масштабов в результате расширения урбанизированных территорий и действия других антропогенных факторов. В соответствии с Государственным докладом о состоянии и об охране окружающей среды РФ за 2019 год площадь нарушенных земель увеличилась на 4,5 тысячи га по сравнению с 2018 годом и составила 1076,9 тысячи га [1]. В докладе также отмечается тот факт, что за последние десять лет наблюдается тенденция к увеличению нарушения земель, определенных под земли промышленности и иного назначения (с 2010 года произошло увеличение на 119,9 тысячи га). Таким образом, организация системы мониторинга территорий

вблизи объектов с высокой техногенной нагрузкой с целью контроля качества окружающей среды и предотвращения возможной деградации почвенного покрова является важной и актуальной темой в настоящий момент.

Главная проблема мониторинга техногенно нагруженных территорий сегодня заключается в получении объективной и своевременной информации об их состоянии.

Различают полевые и лабораторные методы исследования почв [2]. Несмотря на то, что полевые методы применяются непосредственно на месте, они имеют большую погрешность измерения, что не позволяет правильно оценить качество почв. Именно поэтому в большинстве случаев контроль состояния почвенного покрова проводится натуральным методом с забором проб и их исследованием в лабораторных условиях. Лабораторные методы исследования довольно точны, однако трудоемки и длительны. Такой способ так же, как и полевой метод, имеет ряд недостатков, поскольку для реальной оценки почвенного покрова территории необходима непрерывная фиксация его состояния в реальном времени. Обусловлено это несколькими моментами. Во-первых, на территориях с высокой антропогенной нагрузкой возможно резкое повышение токсикантов в почвенном покрове, длительность генерации которых может быть много меньше интервала между измерениями. Во-вторых, лабораторные исследования требуют проведения таких работ, как забор образца пробы, его транспортировка до аккредитованной лаборатории, непосредственное проведение анализа и обработка полученных данных, выходной результат может значительно отличаться от действительности. И, в-третьих, достоверная оценка суммарных потоков загрязнения возможна не по отдельным значениям ряда наблюдений, а по интегралу контролируемого параметра по времени.

Главным преимуществом и особенностью прямого спектрального зондирования по сравнению с известными методами является изучение состава, строения и свойств объектов на месте исследования без каких-либо предварительных операций [2]. Замеры могут проводиться в дистанционном формате путем установки оборудования на любой вид подвижной платформы или с руки оператора. Спектральное зондирование является основой для создания оптических мультисенсорных систем (ОМС). ОМС работают в широком спектральном диапазоне, что при их использовании дает возможность выделения конкретных спектров отражения почв. Это позволит оптимизировать работу по снятию спектральных характеристик и подстроить процесс мониторинга под решение конкретных задач по обнаружению определенного вещества [3].

Идея спектрального зондирования состоит в том, что каждое химическое вещество имеет свои спектральные характеристики [3]. Наблюдение за изменениями в параметрах спектров отражения почв позволит устанавливать присутствие основных биогенных макроэлементов для растений в почве и оценивать ее плодородие. Возможно определение степени загрязнения территории при выявлении токсикантов. Обнаружение отдельных веществ методом спектрального зондирования поможет также формулировать свойства, присущие конкретной изучаемой почве, и составлять поэтапное описание процесса ее самоочищения после техногенного загрязнения.

Именно из-за значительных преимуществ по сравнению с остальными методами был выбран метод прямого спектрального зондирования для наблюдения и контроля за техногенно нагруженными территориями, возможность применения на практике которого рассмотрена в настоящей статье.

**Постановка задачи.** Задачей данного исследования является рассмотрение возможности применения дистанционного спектрального зондирования для контроля состояния техногенно нагруженных территорий.

Спектральные характеристики зависят от состава почв. Так как данная методика разрабатывается для высоконагруженных техногенных ландшафтов, то анализируемые образцы, взятые для эксперимента, по своему составу должны соответствовать составу почв подобных территорий.

Первоначально была проведена оценка основных элементов, которые могут содержаться в почвах подобных ландшафтов. Были выбраны химические показатели, характеризующие свойства большинства почв. Органический углерод был определен как признак гумификации почв, отвечающий за наличие органики. В качестве основных биогенных макроэлементов, необходимых для репродуктивной способности растений, были выделены азот в двух видах (нитратный и нитритный), сера и фосфор. Калий и натрий были взяты на рассмотрение как главные почвенные электролиты. Также были определены зольность, отвечающая за описание инертной составляющей почвенного покрова, и влажность, влияющая на спектральные характеристики почв [4].

Для целей исследования были выбраны территории земель сельскохозяйственного назначения, находящиеся в районе населённых пунктов Самарской области: Большая Черниговка, Кинель-Черкассы, Рождествено, Сергиевск и Хворостянка. Также были исследованы пробы почвы с территорий в районе города Тольятти, не используемых для нужд сельского хозяйства. В точках отбора этих проб наблюдается повышенное

содержание фосфора и азота за счёт техногенного загрязнения. Оно обусловлено близким расположением действующих предприятий («ТольяттиАзот», «КуйбышевАзот») и ликвидированного в настоящее время завода «Фосфор».

Был создан исходный массив данных по химическому составу перечисленных почв по результатам количественно-химического анализа (КХА) лаборатории Научно-аналитического центра промышленной экологии СамГТУ.

**Теоретическая часть.** Для построения регрессионной модели, которая может определять содержание химических элементов в почве, была создана калибровочная база данных. Данные калибровки включили в себя весь набор проб с ранее выясненными показателями, которые впоследствии позволят определять концентрации реальных проб по модели.

Для получения спектральных характеристик образцов была собрана экспериментальная установка. Она включала в себя портативный компьютер с программным обеспечением OceanView, кабель USB для подключения спектрометра, источник излучения — лампа накаливания, миниатюрные спектрометры OceanView STS-UV(УФ) и STS-NIR (ближний ИК), волоконно-оптический зонд или коллиматор.

В установке использовались миниатюрные спектрометры с разными диапазонами исследования. Применялись спектрометр STS-UV для снятия спектров отражения в диапазоне ультрафиолетового излучения (190–650 нм) и STS-NIR для ближнего инфракрасного излучения (650–1100 нм). При данной комбинации спектрометров появляется возможность получения спектров в диапазоне от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного, которые полностью перекрывают весь видимый диапазон. Оборудование позволяет регистрировать спектральный сигнал, обрабатывать его и отображать результаты в виде графического представления на мониторе компьютера. Указанные модели компактных спектрометров выбраны как одни из наиболее компактных, а, следовательно, пригодных для установки на любой вид подвижной платформы или для работы в поле с рук оператора [5]. Использование двух спектрометров позволило в дальнейшем провести их сравнительный анализ и выяснить диапазон спектра, где более четко фиксируется отклик рассматриваемых параметров.

Миниатюрный спектрометр соединялся с волоконно-оптическим зондом. Зондовая техника используется для удобства снятия показаний на несколько удалённом расстоянии от спектрометра в контактном режиме [6].

Преимуществом такой техники является использование стандартизованного источника освещения при отсутствии влияния внешних источников. Зонд имеет несколько основных недостатков: повышает стоимость установки, требует питания для источника освещения, необходим тесный контакт с изучаемым материалом. Это затрудняет его широкое применение. Тем не менее, в исследовательских целях его использование вполне оправдано.

Для использования в полевых условиях в качестве средства бесконтактного или дистанционного зондирования система с зондом заменяется коллиматором. Оптический коллиматор представляет собой объектив (в простейшем случае вогнутое зеркало), в фокальной плоскости которого оказывается матрица спектрометра. Такое расположение позволяет получить приблизительно параллельные пучки излучения. Пятно, с которого производится съёмка спектра отражения, при этом не увеличивается при отдалении спектрометра от поверхности образца. При таком варианте использования в качестве источника излучения используется широкополосная лампа накаливания. Она даёт практически равномерную мощность излучения во всём исследуемом диапазоне. Источник излучения помещался сбоку от места расположения образца на расстоянии порядка 10 см, так же, как и сам спектрометр. Угол между осями падающего излучения и коллиматора составлял 45 градусов, что имитирует положение солнца при полевых работах.

Спектры отражения фиксировались от каждого образца, помещённого на плоскую поверхность в воздушно сухом и мокром (под слоем воды толщиной 1 мм) пространстве. Это позволяло имитировать работу спектрометра в момент выпада атмосферных осадков. Спектральная яркость почв во многом зависит от их состава, определяющего как размер слагающих почву частиц, так и возможный уровень содержания влаги. Увеличение влажности почвы ведет к снижению ее отражательной способности во всем спектральном диапазоне отраженного излучения [7].

Примеры полученных спектров для разных площадок представлены на рис. 1 и 2.

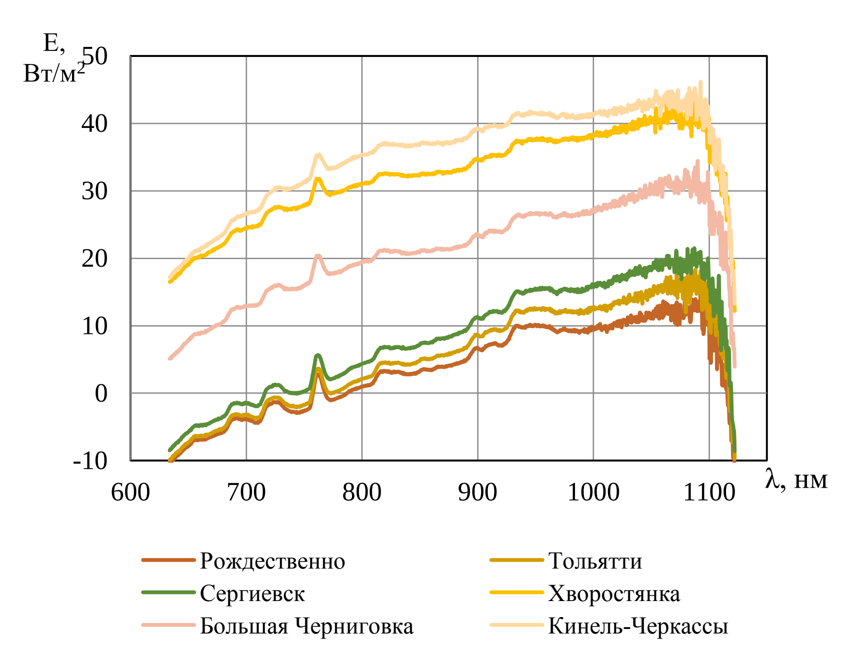



Рис. 1. Спектры исследуемых образцов с разных площадок, снятые в БИК-диапазоне

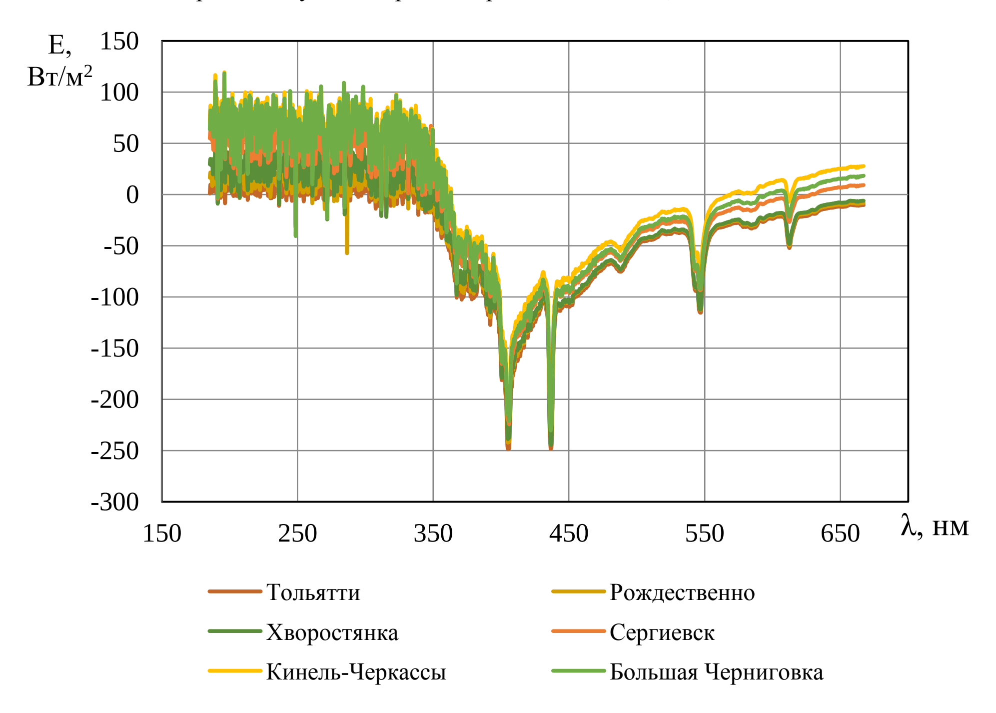



Рис. 2. Спектры исследуемых образцов с разных площадок, снятые в УФ-диапазоне

Поскольку при проведении лабораторного эксперимента удалось снять четкие спектральные кривые, предположительно характеризующие элементный состав образцов почв, и получить некоторую обобщённую модель состояния изучаемых образцов, то следующим этапом работы стала оценка возможности применения такого метода исследования на практике в полевых условиях. По причине того, что лабораторный анализ почв занял длительное время, а ухудшение погодных условий не давало возможности беспрепятственной работы в поле, было принято решение использовать для этих работ те же самые образцы почв, что и в предварительном лабораторном эксперименте. Исследованные образцы размещались на экспериментальной площадке под открытым небом. Для этого проба раскатывалась на площадке около 0,25 квадратных метра, и далее осуществлялась съемка спектра тем же способом, что и на лабораторном этапе. При этом на спектр отражения оказывали влияние погодные условия и положение солнца.

Затем была выполнена процедура перекрёстной проверки [8]. То есть была осуществлена кросс-валидация спектров на натурных образцах почв в реальных условиях с сегментированием 1/5. В качестве тренировочного набора взят массив данных лабораторных исследований спектральных характеристик образцов

почв. Сегмент в 20 % от всего количества образцов был исследован в качестве неизвестных образцов, и проведена оценка совпадения с имеющейся моделью.

Кросс-валидация, или перекрестная проверка, относится к статистическим методам, которые используются для оценки применения модельного метода в реальных условиях. Проверка обычно используется для сравнения теоретических данных с практическими, потому что она проста для понимания, легко реализуема и приводит к достоверной оценке, которая обычно имеет более низкую предвзятость, чем другие методы. Главным её достоинством является работа с уже имеющимися образцами без необходимости пробоотбора.

Спектры отражения фиксировались от каждого пятого образца исследуемых почв, и формировался отдельный набор спектров. Далее процедура повторялась со вторыми по счёту образцами в каждой пятёрке. И так далее до формирования пяти независимых наборов.

При работе на площадках в поправке на яркость не было необходимости, поскольку снимаемые спектры нормировались. Также специально подбиралось время интегрирования для обеспечения оптимального положения спектральных кривых. К тому же фактически проводилась программная стандартизация, что значительно снизило мешающее влияние окружающей среды.

В результате были получены спектральные характеристики образцов, которые затем сравнивались с ранее полученными лабораторными значениями.

Для того чтобы уменьшить разброс результатов спектров, снятых с почв на модельных площадках, циклы кросс-валидации проводились с разным разбиением, и полученные значения усреднялись.

При сравнении снятых спектров в лабораторных и реальных условиях было обнаружено совпадение результатов. Среднее квадратичное отклонение составило не более десяти процентов, что еще раз подтвердило схожесть двух экспериментов. Данная погрешность обусловлена нормированием спектра, поэтому можно говорить о том, что при реальном применении метода она может быть еще меньше.

Сопоставление сухих и мокрых проб показало, что спектральные кривые, полученные при съемке спектра мокрых образцов, более плавные и хорошо отличимые друг от друга (рис. 3). Таким образом, некоторые пики, фиксируемые с сухих почв, при переувлажнении выравниваются. Также установлено, что при наличии воды в пробе снижается так называемый шум в диапазоне длин волн от 950 нм и выше, т. е. увеличивается область определения.

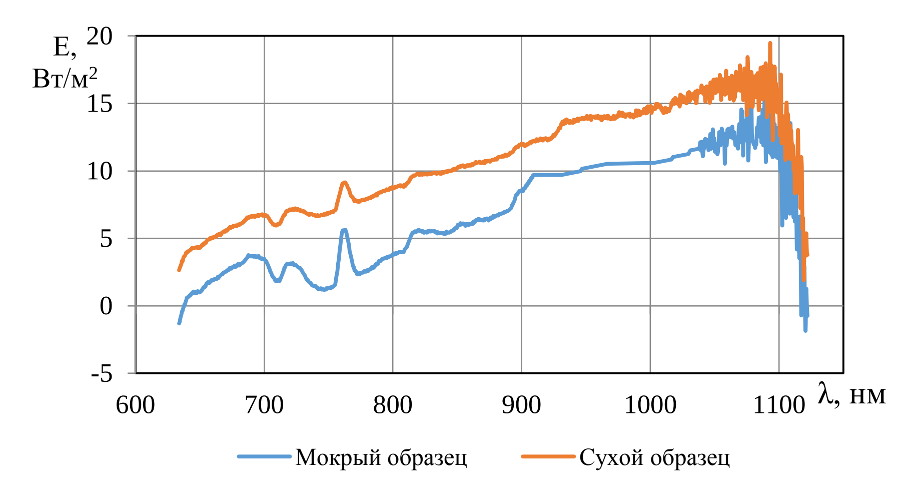



Рис. 3. Сравнение спектров сухих и мокрых образцов

Однако может быть разногласие в результатах анализа сухих и мокрых образцов. Наблюдается понижение значений спектральных характеристик почвы при добавлении к ней воды. К тому же можно заметить изменение угла наклона спектральной кривой.

Для выявления зависимости формы и положения спектральной линии от состава образцов была выполнена многомерная калибровка с применением программного пакета анализа многомерных The Unscrsmbler X. До начала калибровок для оценки единообразия структуры данных первоначально проводилось моделирование методом главных компонент Principal Component Analysis (PCA) — одним из основных способов уменьшить размерность данных, потеряв наименьшее количество информации (шум), и представить данные в виде проекций [9]. Он позволяет выявлять группы образцов со сходными свойствами в

многомерном пространстве и определять связанность (скоррелированность) этого распределения с определёнными свойствами.

Было определено, что образцы с различных участков обладают спектральными различиями, не связанными с указанными в перечне определяемых показателей, и формируют отдельные группы. Тем не менее, даже для разрозненных в пространстве главных компонент участков имеются общие черты. В частности, можно условно выделить области с преимущественным присутствием проб одного из участков, что говорит о принципиальной возможности идентификации участка на основе спектральных характеристик образцов, отобранных на нём. Тем не менее это не являлось целью данной работы, и в дальнейшем рассмотрение данного вопроса не проводилось.

При сравнении образовавшихся областей и количественного химического состава исследуемых почв была найдена связь между ними. Как видно на графике счетов, спектральные характеристики почв разных исследуемых площадок разбились на группы по содержанию наибольшего количества определенного компонента (рис. 4). В области № 2 преимущественно объединились образцы почвенного покрова с большей концентрацией серы, в области № 3 — калия и натрия, области № 4 — азота нитритного и нитратного. Для области № 5 характерны образцы более увлажненные, нежели другие. Присутствие фосфора фиксируется везде, однако в большем количестве все-таки в пробах, попавших в область № 1.

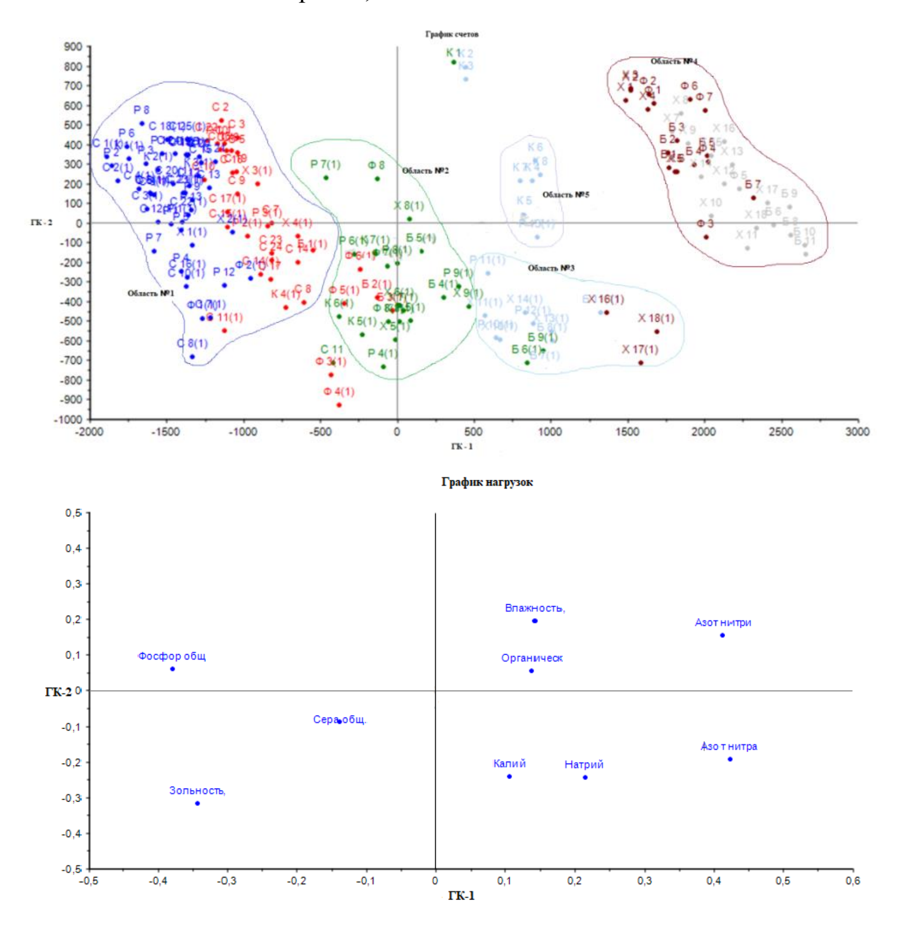



Рис. 4. График образцов (счетов) в многомерном спектральном пространстве:

ГК-1 – главная компонента 1, ГК-2 – главная компонента 2, С – спектральные характеристики почв с. Сергиевка, К – спектральные характеристики почв с. Кинель-Черкассы, Ч – спектральные характеристики почв с. Большая Черниговка, Х – спектральные характеристики почв с. Хворостянка, Р – спектральные характеристики почв с. Рождествено;
Ф – спектральные характеристики почв г. Тольятти

Для выявления структурных особенностей в спектральных данных был рассмотрен график переменных (нагрузок) (рис. 5). Несмотря на комплементарность спектрометров в части спектрального диапазона и спектрального разрешения особенности чувствительной матрицы спектры УФ и БИК-диапазона в многомерном пространстве расположены в виде непересекающихся групп точек, и следует проводить моделирование на их основе раздельно. Наблюдается корреляция химического состава почв с определенными длинами волн.

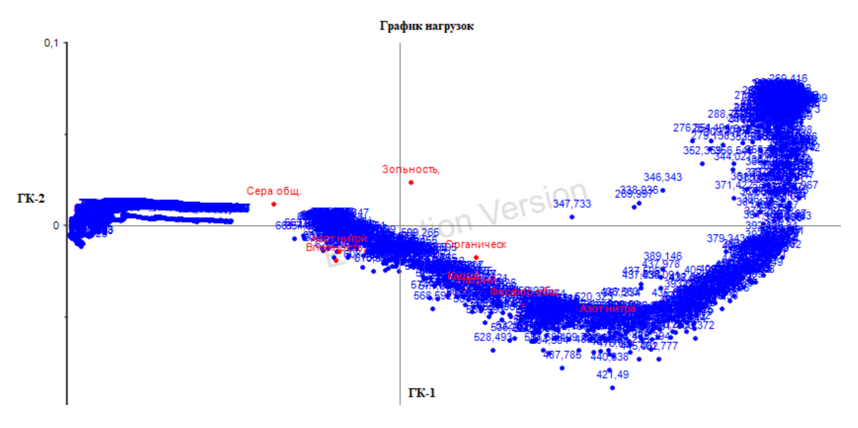



Рис. 5. График нагрузок спектров почв УФ-диапазона

Для оценки структуры данных химического состава и возможности раздельного определения в массиве сведений о содержании отдельных компонентов было также проведено моделирование в многомерном пространстве с использованием метода главных компонент (рис. 6).

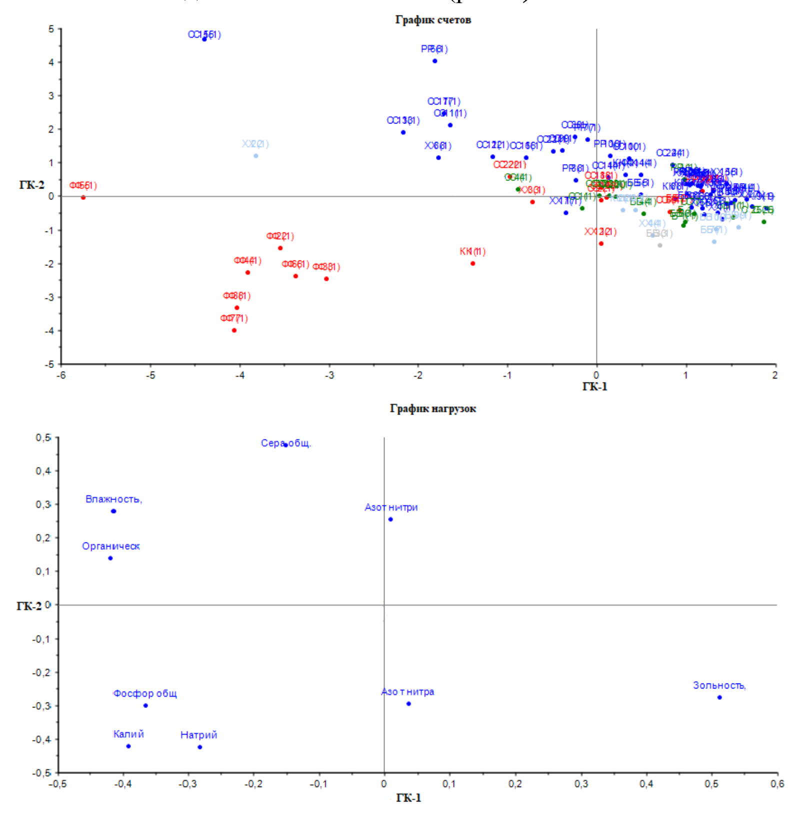



Рис. 6. Сопоставление графиков счетов и нагрузок:

ГК-1 – главная компонента 1, ГК-2 – главная компонента 2, С – спектральные характеристики почв с. Сергиевка, К – спектральные характеристики почв с. Кинель-Черкассы, Ч – спектральные характеристики почв с. Большая Черниговка, Х – спектральные характеристики почв с. Хворостянка, Р – спектральные характеристики почв с. Рождествено, Ф – спектральные характеристики почв г. Тольятти

Полученные графики позволили оценить ситуацию по отдельным компонентам и найти корреляцию между ними. Корреляция была выявлена для азота, фосфора и серы, что может служить подтверждением возможности использования спектральных характеристик при оценке качества почвенного покрова.

Если говорить об образцах с разных площадок, то они оказались скоординированы вблизи начала оси графика счетов, что может говорить об их высокой зависимости, т. е. схожести по наличию определенного компонента, например, азота нитритного, который попадает в подобную область на графике нагрузок.

Также можно сделать вывод об отрицательной корреляции нитритного и нитратного азота в пробах. Нитритный азот переходит в процессе окисления в нитратный, и данная корреляция логична. Такой же вывод можно сделать по обратной корреляции таких характеристик, как влажность и зольность [9].

Были проанализированы графики оценки точности предсказания для всех рассматриваемых химических элементов (рис. 7). Среднее квадратичное отклонение (R-Square) для фосфора достигает 46 процентов, что позволяет говорить о том, что модель уже сейчас является работоспособной даже при условии достаточно высокой зашумленности, нечеткости, а также влияния других факторов и соединений. Для такого неконтактного метода определения, который будет использоваться в полевых условиях, полученное среднее квадратичное отклонение является допустимым для проведения предварительной оценки содержания химического элемента в почвенном покрове.

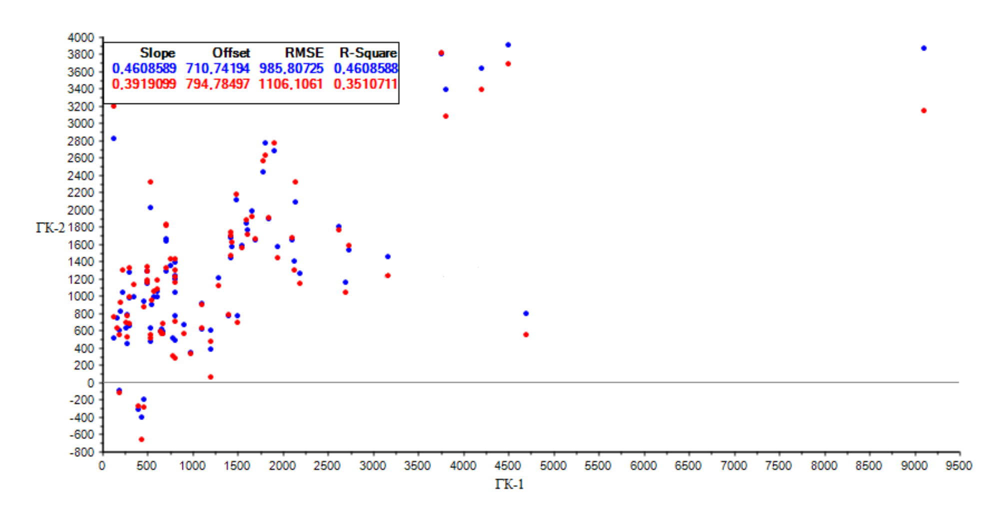



Рис. 7. График оценки точности предсказания

В целом данная модель подтверждает независимость определения компонентов почв. Полученный результат подтверждает возможность использования спектральных характеристик при оценке качества почв.

Однако использование полноспектральных моделей зачастую затруднительно, так как требуется быстрая обработка значительных массивов данных и их длительное хранение. Возникает потребность в разработке более удобных способов работы с системами многофакторной оценки состояния почв. Для повышения информативности предложен метод индексирования в формате «большее содержание компонента — меньшее содержание компонента» [4].

В настоящее время существует около 160 вариантов вегетационных индексов [11]. Они подбираются экспериментально, исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. Главным преимуществом индексов является их доступность на разных уровнях зондирования с минимизации математической обработки получаемых данных. Тем не менее большая часть этих индексов применяется для описания состояния растительного покрова, а не почв. Так, применение индексирования для оценки состояния почвенного покрова является немаловажной частью описания состояния объектов исследования и моделирования.

Создаваемые расчетные критерии, состоящие из нескольких интенсивностей на определенных длинах волн, могут иметь корреляцию с искомыми концентрациями лучше, нежели напрямую со спектрами. Они не дают абсолютных значений, но в относительных величинах могут хорошо применяться при моделировании состояния почв. При этом в дальнейшем применение этих индексов предоставит возможность за счёт выявления внутренних взаимосвязей между индексами непрерывно пополнять и уточнять модель без проведения объёмных натурных и лабораторных исследований.

**Выводы.** По результатам выполненной работы выявлена возможность применения прямого спектрального зондирования для оценки состояния почв как при непосредственном контакте, так и дистанционно. Многомерная калибровка позволяет найти корреляции между формами спектральных характеристик и химическим составом исследуемых образцов. Подбор формата индекса и соответствующих для него спектральных полос является необходимым этапом создания ОМС для контроля состояния почв.

**Библиографический список**

1. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [сайт]. — URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/ (дата обращения: 27.02.2021).

2. Семендяева, Н. В. Методы исследования почв и почвенного покрова : учебное пособие / Н. В. Семендяева, А. Н. Мармулев, Н. И. Добротворская. — Новосибирск : Изд-во НГАУ, 2011. — 202 с.

3. Bogomolov A. Optical multisensor systems and their process applications / A. Bogomolov, T. P'yatak , M. Klein // Advances in Process Analytics and Control Technology (APACT). — Chester, UK. — 2019.

4. Чеснокова, С. М. Экологический мониторинг : учебное пособие / С. М. Чеснокова, О. В. Савельев. — Владимир : АРКАИМ, 2016. — 84 с.

5. Молев, А. А. Дистанционный мониторинг почв / А. А. Молев // Наука в мегаполисе. Science in a Megapolis. — 2021. — № 1 (27). — 12 с.

6. Картография, фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли : учебное пособие / М. В. Панасюк, Ф. Н. Сафиоллин, Н. А Логинов, Е. М. Пудовик. — Казань : Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2018. — 121 с.

7. Жуков, В. Д. Методы дистанционного зондирования в землеустройстве / В. Д. Жуков. — Краснодар : КубГАУ, 2016. — 90 с.

8. Комаров, А. А. Использование сопряженных данных дистанционного и наземного зондирования при оценке состояния растительного покрова / А. А. Комаров, А. А. Комаров // Экология родного края: проблемы и пути их решения : материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Киров, 2018. — С. 77–81.

9. Эсбенсен, К. Анализ многомерных данных : избр. главы / К. Эсбенсен ; пер. с англ. С. В. Кучерявского ; под ред. О. Е. Родионовой. — Черноголовка : изд-во ИПХВ РАН, 2005. — 157 с.

10. Агрохимическое обследование и мониторинг почвенного плодородия : учебное пособие / А. Н. Есаулко, Ю. И. Гречишкина, А. И. Подколзин [и др.]. — Ставрополь, 2009. — 252 с.

11. Черепанов, А. С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А. С. Черепанов, Е. Г. Дружинина // Геоматика. — 2009. — № 3. — С. 28–32.

Сдана в редакцию 31.05.2021
Запланирована в номер 12.07.2021

*Об авторах:*

**Бердникова Татьяна Владимировна**, магистрант Самарского государственного технического университета (443100, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5441-4853, tatyana.berdnikova.98@mail.ru

**Ермаков Василий Васильевич**, доцент кафедры «Химическая технология и промышленная экология» Самарского государственного технического университета (443100, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7720-2418, ncpe@mail.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

Т. В. Бердникова — формирование цели и задачи исследования, проведение эксперимента, подготовка текста, формирование выводов; В. В. Ермаков — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Submitted 31.05.2021
Scheduled in the issue 12.07.2021

*About the Authors:*

**Berdnikova, Tatyana V.**, Master's degree student, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5441-4853, tatyana.berdnikova.98@mail.ru

**Ermakov, Vasiliy V.**, Associate professor, Department of Chemical Technology and Industrial Ecology, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, RF), Cand.Sci., ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7720-2418, ncpe@mail.ru

*Contribution of the authors:*

T. V. Berdnikova — formulation of the purpose and objectives of the study, conducting the experiment, text preparation, formulation of the conclusions; V. V. Ermakov — scientific supervision, analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions.